

“Despliegues de Femtoceldas LTE en Interiores: Comparación con Otras Tecnologías Inalámbricas”

Mariano Molina García⁽¹⁾, Alfonso Fernández Durán⁽²⁾, J.I. Alonso⁽³⁾

¹mmolina@gmr.ssr.upm.es, ²alfonso.fernandez_duran@alcatel-lucent.es, ³ignacio@gmr.ssr.upm.es
(1)(3) E.T.S.I. Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria 28040 Madrid, España
(2) Alcatel-Lucent Spain, Ramirez de Prado 5, 28045 Madrid, España

Abstract- Long Term Evolution (LTE) has appeared with the aim of improving the performance of 3G networks, increasing spectral efficiency and peak rates both at downlink and uplink, reducing latency and increasing flexibility of frequency allocation. Therefore, LTE is expected to have a key role in the development of wireless networks and services in the next years, and, of course, in specific dedicated in-building solutions. Due to that fact, an analysis of LTE performance in indoor scenarios in terms of capacity and grade of service is essential, as well as its comparison with other indoor solutions, pointing out the technical challenges derived, and describing and proposing performance assessment rules to be used in LTE deployments.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la mayoría de usuarios de servicios inalámbricos, se encuentran ubicados en el interior de los edificios. Por lo tanto, a la hora de realizar el diseño e implementación de soluciones en interiores, es muy importante la provisión de márgenes suficientes de cobertura, especialmente si se ofrecen servicios con altos requisitos de velocidad de transmisión. Esta necesidad, añadida a los problemas derivados de ofrecer cobertura en interiores con soluciones diseñadas para ofrecer cobertura en exteriores, hace necesario el despliegue de soluciones Indoor dedicadas.

Existen hoy en día diversas soluciones dedicadas en interiores que compiten con el fin de cumplir con estas demandas de cobertura y calidad de servicio. Las redes IEEE802.11, debido a su amplio despliegue y a la aparición del estándar IEEE 802.11e, específicamente diseñada para dar soporte a servicios de tiempo real, son una de las soluciones preferidas para mejorar el comportamiento en interiores como parte de soluciones convergentes fijo-móvil. La respuesta de los operadores móviles ante estas redes son las femtoceldas 3G, que se aprovechan de las mayores tasas de transferencia que se pueden conseguir en la actualidad gracias a las tecnologías HSPA y HSPA+. Las femtoceldas son pequeñas estaciones base, de bajo coste y consumo, que incrementan la cobertura en interiores, ofreciendo servicios de voz y datos de alta velocidad, y constituyen una forma alternativa de aprovechar los beneficios de la convergencia, ofreciendo una experiencia de usuario ubicua en todos los entornos sin necesidad de recurrir a terminales duales que trabajen con puntos de acceso WiFi y 3G..

En el contexto actual de gran incremento de transferencia de datos en movilidad, una nueva tecnología, Long Term Evolution (LTE), ha aparecido con la intención de mejorar el rendimiento de las redes 3G, aumentando la eficiencia espectral y la tasa de transferencia, al mismo tiempo que se reduce la latencia y se flexibiliza el reparto de frecuencias. Es de esperar que LTE juegue un papel clave en el desarrollo de redes y servicios móviles tanto en soluciones exteriores como en soluciones específicas de interiores en los próximos años.

Por ello es necesario un análisis sobre el rendimiento de LTE en entornos interiores en términos de capacidad y grado de servicio, así como su comparación con otras soluciones inalámbricas de interiores.

II. CONSIDERACIONES SOBRE PROPAGACIÓN EN INTERIORES

La propagación radio en interiores está condicionada tanto por la estructura del edificio como por los materiales que lo componen. Se han propuesto diversos modelos para caracterizar la propagación en interiores. La mayoría cuantifican las pérdidas de propagación dividiéndolas en diversos factores. Entre ellos, encontramos la potencia recibida en un punto de referencia, un factor que depende de la distancia y la potencia recibida, que además está ponderado por un parámetro “n”, que depende típicamente de la frecuencia y de la estructura del edificio, pudiendo variar para diferentes rangos de distancia. Hay modelos que no incluyen directamente el efecto de los obstáculos sobre la propagación, lo incluyen en dicho parámetro “n”. Sin embargo, otros modelos si consideran la contribución individual de suelos y paredes y algunos de ellos ponderan el factor de atenuación según el número de paredes del mismo tipo previamente atravesadas. Estos modelos se conocen como modelos MultiWall, y la pérdida de propagación puede ser calculada como (1):

$$PL = Lo + 10 \cdot n \cdot \log(d) + \sum_{i=1}^I k_{wi} \cdot L_{wi} + \sum_{j=1}^J k_{fj} \cdot L_{fj} \quad (1)$$

Donde Lo son las pérdidas de propagación a 1 metro, n es un factor que depende del entorno y de la frecuencia, k_{wi} es el número de paredes de tipo “i” que son atravesadas y L_{wi} es un factor de pérdidas asociados a cada pared de tipo “i”. Análogamente, k_{fj} y L_{fj} son el número de suelos de tipo “i” atravesados y su factor de atenuación asociado a cada uno. Se han realizado diversos estudios para caracterizar los parámetros “Lo” y “n”, así como los factores de atenuación para diferentes tipos de paredes, en diferentes entornos y frecuencias. Estos datos se muestran en la Tabla 1 para un escenario de referencia considerado en las simulaciones llevadas a cabo para IEEE802.11 en la banda de 2.4 GHz y 5 GHz, 3G en la banda de 1.8 GHz y LTE usando las bandas de 900 MHz y 2.6 MHz. Como se puede observar, los valores de los parámetros aumentan con la frecuencia, así que los sistemas que trabajen con frecuencias altas, tendrán menor área de cobertura, aunque también se verá disminuida la interferencia entre los dispositivos que trabajen en la misma frecuencia, lo cual es importante en despliegues de interiores.

FRECUENCIA	LO (DB)	N	PARED FINA	PARED GRUESA	MURO EXTERIOR
900 MHz	35	3	2.5	5	10
1800 MHz	38	3.5	3	6	13
2400 MHz	40	4	3.5	7	15
5000 MHz	46	4.3	5.5	9	20

Tabla 1. Parámetros del modelo MWM.

III. PROCEDIMIENTO DE ESTIMACIÓN DE GOS EN LTE

Para la estimación de la calidad de servicio en LTE, para una determinada topología de red y unas condiciones de tráfico específicas, se propone el procedimiento descrito a continuación. En primer lugar, se deben definir los distintos grupos de usuarios activos en la zona de despliegue, cada uno de los cuales con sus requisitos específicos, dependientes del tipo de servicio y otros condicionantes. Tras esto, para una determinada configuración de tráfico, se inicia un proceso de simulación estática, ubicándose en cada iteración del proceso de estimación de calidad cada uno de los usuarios activos, que estarán caracterizados por el tipo de servicio, su tasa binaria y otros parámetros asociados a sus requisitos de calidad. Usando los modelos comentados en la sección II, se procede al cálculo de las pérdidas de propagación para cada usuario. Y con ello al cálculo de la potencia en recepción, teniendo en cuenta los datos de potencia del transmisor, parámetros de antena, pérdidas de terminales, etc. Con el valor de la potencia en recepción, se asocia a cada usuario con una estación base y se empieza un proceso iterativo para estimar la relación señal a ruido más interferencia (SINR) para cada usuario, que determinará su máxima tasa de transferencia. Aunque en sistemas LTE multicelda el rendimiento se puede mejorar mediante el uso de coordinación de la interferencia, en la simulación se ha considerado interferencia aleatoria sin coordinación.

Este proceso iterativo está estrechamente relacionado con el proceso de reparto de recursos, debido al hecho de que la tasa máxima de transferencia dependerá de la modulación y el esquema de codificación (MCS) seleccionado en los procedimientos de adaptación de enlace y en el número de subportadoras asignadas a cada usuario. Además, el número de subportadoras asignadas a un usuario influirá en la interferencia total de otro usuario que trabaje en la misma frecuencia, lo cual afecta a su vez al valor de SINR estimado, y esto a su vez influye en el esquema de MCS a seleccionar y por tanto en la tasa de transferencia para ese usuario.

Es por esto que primero se debe de definir una política de reparto de recursos para usarla en el proceso iterativo. Después, en cada iteración se determina el mejor esquema MCS que se puede elegir sin tener en cuenta los requisitos de interferencia. En otras palabras, se emplea la relación señal a ruido (SNR) y los valores de calidad estimados del canal (CQI) para consultar en las tablas definidas en el estándar cuál es el MCS apropiado para cada usuario. El siguiente paso es; teniendo en cuenta los requisitos de tasa de transferencia de cada tipo de servicio, el esquema MCS y la política de reparto de recursos, asignar subportadoras a cada usuario mediante un esquema de tipo Round Robin. Después se compara para cada usuario la velocidad asignada y la requerida por cada servicio. Para aquellos usuarios que hayan obtenido más recursos de los requeridos, se recalcula el reparto de recursos hasta que la velocidad obtenida sea igual a la velocidad requerida. Los recursos sobrantes se reasignan empleando las políticas de reparto de recursos entre los

usuarios que no consiguieron alcanzar la tasa de transferencia objetivo. Cada vez que se reasignan recursos, la SINR cambia y por tanto los esquemas MCS y el reparto de subportadoras, con lo cual hay que recalcular para cada usuario la tasa de transferencia alcanzable con esos recursos. Este proceso iterativo finaliza cuando la asignación de bloques de recursos converge a una solución estable.

IV. ESCENARIO DE SIMULACIÓN Y RESULTADOS

El escenario elegido para realizar la comparación se muestra en la Figura 1. Está compuesto por 6 apartamentos de 120 m² con dos posibles configuraciones de femtoceldas, grupos de subscripción abiertos o cerrados. La localización de las estaciones base se realizó de tal modo que se simulen el caso peor, femtoceldas más cercanas, y el caso mejor, femtoceldas más alejadas. Por tal motivo se han escogido dos posibles localizaciones de femtoceldas en cada apartamento. En la configuración A, las femtoceldas están muy cercanas unas a otras y por tanto hay elevados niveles de interferencia, afectando a la capacidad global y al grado de servicio. En la otra configuración (B), las femtoceldas están suficientemente separadas unas de otras pero se mantiene un nivel de cobertura suficiente en cada apartamento. En cuanto al modo de operación, se evaluará tanto el funcionamiento en modo abierto (OSG) como en modo cerrado (CSG). El modo OSG es un despliegue de red controlado por la operadora en entornos de oficinas u otro tipo de entornos abiertos donde se pretende ampliar el nivel de cobertura, mientras que el modo CSG es típico de entornos residenciales donde las estaciones son ubicadas por el usuario y sólo se permite la conexión de dispositivos autorizados por él.

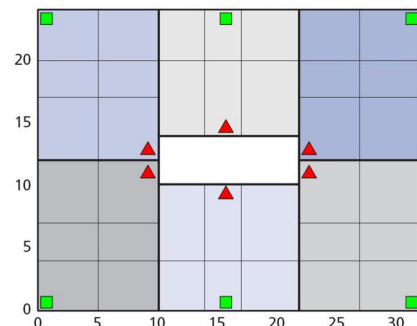


Fig. 1 Escenario de simulación con APs en las dos configuraciones

Respecto a las frecuencias de trabajo, son las comentadas en el apartado II y recogidas en la Tabla 1. Todos los usuarios están caracterizados mediante servicios de datos de 384 kb/s para poder hacer una comparación directa entre las diferentes tecnologías bajo estudio. Para facilitar y simplificar los cálculos, todas las paredes interiores del edificio tienen el mismo factor de atenuación para una frecuencia dada. De igual modo, todas las paredes que separan apartamentos también poseen el mismo factor de atenuación. Los diagramas de radiación de las antenas de las estaciones bases de las femtoceldas se supone son omnidireccionales, lo cual permite que los resultados sean independientes de la elección de uno u otro tipo de antena. La máxima potencia transmitida en el enlace descendente por la estación base está limitada a 20 dBm, y en el enlace ascendente, la máxima potencia transmitida por el terminal es de 21 dBm.

El proceso de simulación se basa en un simulador estático de tipo Monte Carlo. Una vez definidos el número de terminales de usuario presentes en la simulación, éstos se

ubican aleatoriamente en el escenario. Para la iteración inicial, cada usuario es asignado a una estación base LTE según su posición por el criterio de mínima atenuación. El número de iteraciones necesario para alcanzar la convergencia depende del número de usuarios asignados a cada femtocelda.

A. GOS y número de usuarios simultáneos.

El primer paso es realizar un estudio de la tasa de transferencia y del número máximo de usuarios simultáneos que cada tecnología es capaz de dar servicio con un determinado grado de servicio en un despliegue de femtoceldas. En la Tabla 2 se muestra una comparación en términos de número simultáneo de usuarios para despliegues LTE en 900 MHz y 2.6 GHz, con todas las femtoceldas en configuración cocanal y usando diferentes anchos de banda de canalización. Lo más remarcable de este estudio, es que los despliegues en LTE 2.6 GHz ofrecen mejores resultados que los despliegues LTE en 900 MHz. La razón para esto es que en los despliegues con gran densidad de femtoceldas desplegadas, los usuarios están muy cercanos a las estaciones base y por lo tanto, independientemente de la frecuencia de trabajo, emplean el esquema MCS más eficiente debido a que las pérdidas de propagación son bajas. Sin embargo, las frecuencias más bajas permiten un mayor alcance y por lo tanto aumenta el nivel de las interferencias, lo cual empeora el comportamiento general de la red en entornos cerrados que usen la misma frecuencia para las femtoceldas desplegadas. Sin embargo, si se empleasen esquemas de control de la interferencia, por ejemplo usando canales diferentes en cada femtocelda, ambos despliegues ofrecerían iguales resultados y se aumentaría significativamente el número de usuarios tanto en el enlace ascendente como en el descendente.

Se han realizado también simulaciones con diversos anchos de banda de canalización (5, 10 y 20 MHz) para mostrar que el incremento del número simultáneo de usuarios es prácticamente lineal con el incremento de la frecuencia y es muy similar para el enlace ascendente y descendente. Como se puede ver, en despliegues monocanal el número de usuarios es aproximadamente la mitad que en despliegues con control de interferencia.

En IEEE 802.11, un máximo de 3 canales no solapados de 20 MHz se pueden asignar en redes IEEE 802.11g en 2.4 GHz, mientras que en redes IEEE 802.11a en 5 GHz se puede asignar un máximo de 8 canales de 20 MHz no solapados. Hay que destacar que hay una ligera ganancia en cuanto al número de usuarios cuando se emplea IEEE 802.11a en lugar de IEEE 802.11g, debido al hecho ya comentado de que más altas frecuencias tendrán mayores pérdidas de propagación, reduciendo la interferencia. En estos entornos donde cada estación base cubre un área lo suficientemente pequeña como para lograr que todos los usuarios asociados a ella reciban un nivel de señal lo suficientemente bueno que les permita trabajar con el mejor esquema MCS, independientemente de la frecuencia, el nivel de interferencia en 2.4 GHz es superior debido a las condiciones de propagación y por lo tanto su rendimiento es peor. Este efecto es fundamental en todos aquellos sistemas que carecen de control de potencia, como el IEEE 802.11.

Además, estas condiciones de propagación lo suficientemente buenas, aumentan el rango del “carrier sense”, lo que si bien permite que dos dispositivos cocanal no se interfieran, aumenta la competencia por el acceso al medio

disminuyendo el caudal efectivo de la red. En las simulaciones, la ganancia en términos de número simultáneo de usuarios para un nivel de GOS determinado, es prácticamente lineal con el número de canales usados.

Cuando evaluamos femtoceldas 3G/HSPA, en el enlace descendente hay una ganancia muy elevada si empleamos HSDPA en lugar de WCDMA R99 como era de esperar. El número de usuarios activos simultáneamente en la red puede incrementarse de 3 a 4 veces dependiendo de los requisitos de GOS. HSDPA emplea modulación y codificación adaptativa que permite el uso de modulaciones más eficientes, lo cual hace posible que en cortos periodos de tiempo se comparta el canal de manera más eficiente y se incremente el caudal medio de la red, y por lo tanto, el número máximo de usuarios simultáneos de la red. Este razonamiento también es válido para HSPA+ que hace uso de modulaciones aún más eficientes, lo cual permite emplear periodos aún más cortos de tiempo para asegurar que un usuario recibe la tasa de transferencia requerida y por lo tanto un mayor número de usuarios pueden estar activos simultáneamente.

Sin embargo, en el enlace ascendente no hay una ganancia significativa comparada con el uso de WCDMA debido a que con el control de potencia en terminales HSUPA, sólo permite transmitir la potencia necesaria para alcanzar la tasa de transferencia requerida, por lo que no se hace uso de las capacidades de HSUPA para proveer mayores tasas de transferencia. Por la misma razón no habrá tampoco una ganancia significativa con el uso de HSUPA+. De esta manera, tanto HSDPA como HSDPA+ permiten alcanzar elevadas tasas de transferencia, lo que incrementa el número de usuarios simultáneos, incluso para servicios con escasos requisitos en términos de velocidad, debido a las características del canal HS-DSCH y su procedimiento de compartición. Mientras tanto, HSUPA también permite alcanzar elevadas tasas de transferencia para un usuario, pero si estas no son requeridas por el tipo de servicio definido, no habrá una ganancia significativa respecto al uso de WCDMA.

B. Impacto de la ubicación de las femtoceldas.

Los resultados referidos al impacto del posicionamiento de las estaciones base se presentan a continuación, evaluando la importancia del posicionamiento relativo de estas en el escenario de despliegue. Respecto al impacto del posicionamiento en LTE, los resultados obtenidos para el mejor y el peor caso han sido estudiados y se muestran en la Tabla 3. Se puede observar para LTE que el número de usuarios simultáneos decrece considerablemente para las configuraciones con las femtoceldas cercanas unas a otras respecto a la configuración con las femtoceldas más alejadas. Este efecto es mucho más acusado en el enlace ascendente, donde el número de usuarios se reduce a la mitad porque las femtoceldas LTE cercanas provocan un incremento de la potencia interferente debido a las femtoceldas que trabajan en la misma frecuencia. La SINR en la femtocelda se reduce y este hecho provoca el empleo de esquemas MCS más robustos y por tanto menos eficientes. Así, es necesario asignar a un usuario un número más elevado de bloques de recursos para obtener la tasa de transferencia requerida y por tanto habrá menos usuarios activos simultáneos.

En el IEEE 802.11 el efecto de la localización de los puntos de acceso no tiene tanta importancia debido a que el factor dominante responsable de la disminución del caudal y por tanto de los usuarios activos no es la interferencia, sino el

mecanismo de control de acceso al medio y el número de dispositivos contendientes. Sin embargo, hay una ligera ganancia si se emplea la configuración con las femtoceldas más alejadas entre sí, debido a la reducción de la interferencia en el enlace descendente y a la reducción del número de usuarios en el rango del “*carrier sense*”. Este efecto es más importante en los despliegues de IEEE 802.11a por el incremento de las pérdidas de propagación en frecuencias elevadas. En 3G-HSPA si las femtoceldas se ubican muy cercanas unas a otras, el número de usuarios activos para un GOS determinado se reduce dramáticamente. Este efecto está causado por el incremento de la interferencia global en el sistema, que afecta tanto a la tasa de transferencia como al grado de servicio. Finalmente hay que reseñar, que en este tipo de despliegues la localización de las femtoceldas la escoge el usuario y por lo tanto este efecto indeseado sobre el caudal y el GOS no puede ser controlado.

C. Impacto de la elección de configuraciones OSG o CSG.

Finalmente, se evalúa para cada caso el efecto de usar grupos de subscripción cerrados (CSG) o abiertos (OSG). Las variaciones en el rendimiento para las diferentes tecnologías consideradas cuando se usan los dos tipos de grupos de subscripción se muestran en la tabla 4. En los despliegues de IEEE 802.11 y LTE cuando las estaciones bases están alejadas entre sí, las diferencias en las pérdidas de propagación de distintos APs pueden ser considerables, y la asociación de un terminal a uno u otro tiene un efecto significativo sobre la interferencia global y el caudal de la red. En el caso de 3G-HSPA, si las estaciones base están muy alejadas entre sí, es indiferente la elección de OSG o CSG. Esto se explica debido a que para la mayor parte de los usuarios de un apartamento, el mejor servidor es el ubicado en el propio apartamento. En cambio, si las femtoceldas están cercas unas de otras, en este caso es preferible la elección de OSG. En OSG, el mejor servidor se elige para cada usuario y por tanto, la interferencia en el sistema se reduce respecto a la que habría en un entorno con configuración CSG. Esto se traduce en un aumento del caudal y por tanto en el número de usuarios activos.

En el estudio realizado, el efecto de usar OSG o CSG en el número de usuarios simultáneos no es muy importante, ya que la ubicación de los usuarios es aleatoria en el escenario, con igualdad de probabilidad de estancia en cualquier punto del mismo, resultando equidistribuidos en los apartamentos. Si no se parte de esta premisa, la elección sí que tendría un gran efecto sobre la interferencia global de la red, y por lo tanto en la calidad de experiencia percibida por el usuario.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado el análisis realizado para evaluar el rendimiento de LTE en escenarios de interiores, así como la comparación con otras soluciones por medio de simulaciones. Los resultados obtenidos en los procesos de evaluación muestran las ventajas significativas que puede ofrecer LTE sobre las soluciones basadas en IEEE 802.11 y 3G/HSPA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo del Ministerio de Educación y Ciencia en el marco del proyecto TEC2008-02148/TEC. Así mismo, agradecen el apoyo del Ministerio de Industria, Turismo y Ciencia en el marco del proyecto CELTIC Project EasyWireless II TSI-020400-2008-56.

GOS (%)	NUMERO DE USUARIOS POR FEMTOCELDA			
	LTE 0.9GHz 5 MHz 1f UL/DL		LTE 0.9GHz 5 MHz 6f UL/DL	
< 1	26	23	56	56
< 5	30	27	58	58
GOS (%)	LTE 2.6GHz 5MHz 1f UL/DL		LTE 2.6GHz 5 MHz 6f UL/DL	
< 1	33	30	56	56
< 5	37	35	58	58
GOS (%)	LTE 0.9GHz 10 MHz 1f UL/DL		LTE 0.9GHz 20 MHz 1f UL/DL	
< 1	52	47	103	93
< 5	60	56	117	109
GOS (%)	LTE 2.6GHz 10 MHz 1f UL/DL		LTE 2.6GHz 10 MHz 6f UL/DL	
< 1	64	57	112	112
< 5	73	69	116	116
GOS (%)	LTE 2.6GHz 20 MHz 1f UL/DL		LTE 2.6GHz 20 MHz 6f UL/DL	
< 1	127	115	224	224
< 5	145	137	232	232
GOS (%)	IEEE802.11g / 802.11a 20 MHz 1f		IEEE802.11g / 802.11a 20 MHz 3f	
< 1	10	12	34	70
< 5	12	14	38	72
GOS (%)	3G R99 5MHz 1f UL/DL		HSUPA / HSDPA 5MHz 1f	
< 1	5	5	5	12
< 5	6	8	7	22
GOS (%)	HSUPA / HSUPA+ 5MHz 1f		HSDPA / HSDPA+ 5MHz 1f	
< 1	6	6	18	19
< 5	6	6	28	33

Tabla 2. Usuarios simultáneos y GOS (Far Femtocells-CSG).

GOS (%)	NUMERO DE USUARIOS POR FEMTOCELDA			
	FEMTOCELDA CERCANAS		FEMTOCELDA LEJANAS	
	LTE 2.6 GHz 5MHz 1f UL / DL		LTE 2.6 GHz 5MHz 1f UL / DL	
< 1	12	16	33	30
< 5	15	21	37	35
GOS (%)	IEEE 802.11g / 802.11a 20 MHz 1f		IEEE 802.11g / 802.11a 20 MHz 1f	
< 1	10	10	10	12
< 5	12	12	12	14
GOS (%)	HSUPA / HSDPA 5MHz 1f		HSUPA / HSDPA 5MHz 1f	
< 1	6	18	8	27
< 5	6	28	9	28

Tabla 3. Impacto en el rendimiento de la localización de femtoceldas

GOS (%)	NUMERO DE USUARIOS POR FEMTOCELDA			
	GRUPO CERRADO		GRUPO ABIERTO	
	LTE 2.6 GHz 5MHz 1f UL / DL		LTE 2.6 GHz 5MHz 1f UL / DL	
< 1	12	16	14	19
< 5	15	21	16	23
GOS (%)	IEEE 802.11g / 802.11a 20 MHz 1f		IEEE 802.11g / 802.11a 20 MHz 1f	
< 1	10	10	10	10
< 5	12	12	12	12
GOS (%)	HSUPA / HSDPA 5MHz 1f		HSUPA / HSDPA 5MHz 1f	
< 1	6	18	7	25
< 5	6	28	7	27

Tabla 4. Impacto en el rendimiento de la configuración de acceso